

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОСТРОЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

И. И. КАЛЯЦКИЙ

(Представлено научным семинаром по диэлектрикам ТПИ)

Введение

Принцип получения высоких кратковременных напряжений (импульсов напряжения) с использованием в качестве переключающих элементов искровых промежутков был предложен в 1914 г. проф. В. К. Аркадьевым и осуществлен практически инж. Н. В. Баклиным, который впервые соорудил так называемый „искровой конденсаторный трансформатор“ [4]. Основной частью такого „трансформатора“ являются конденсаторы, заряжаемые параллельно через достаточно большие сопротивления от источника постоянного или переменного напряжения. При пробое искровых промежутков все конденсаторы оказываются в последовательном соединении, и напряжение на выходе генератора возрастает в идеальном случае в n раз, где n —коэффициент трансформации, равный числу конденсаторных групп, заряжаемых параллельно.

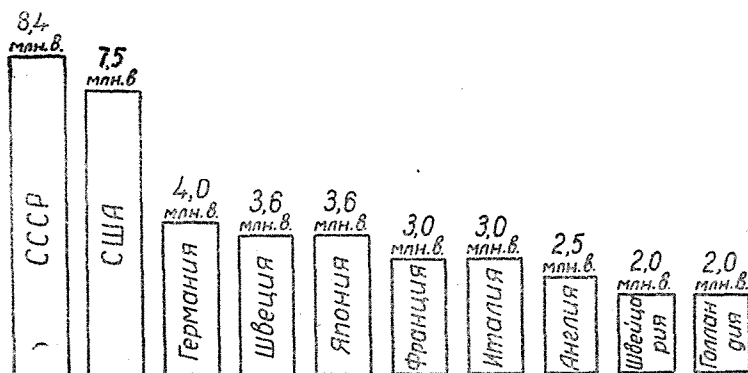
В 20-х годах уже появились технические установки для получения высокого напряжения, основанные на использовании принципа, предложенного проф. В. К. Аркадьевым, которые распространились под названием „генератор молний“, „импульсный генератор“ „генератор импульсов высокого напряжения“ и т. п.

В первые годы своего создания импульсный генератор предназначался для исследований и испытаний электрической изоляции как установка, имитирующая воздействие перенапряжений при разряде атмосферного электричества в виде молнии. Такие импульсные испытания, введенные с 1930 г. для изоляции трансформаторов высокого напряжения, привели к улучшению конструкций трансформаторов и резкому снижению аварийности на линиях электропередач высокого напряжения.

Например, в одной из энергосистем за период с 1931 г. по 1944 г. в среднем ежегодно повреждалось 15% трансформаторов. В 1947 году из 500 испытанных было повреждено 10%. В 1949 году из 1000 испытанных повреждено всего 3% [33].

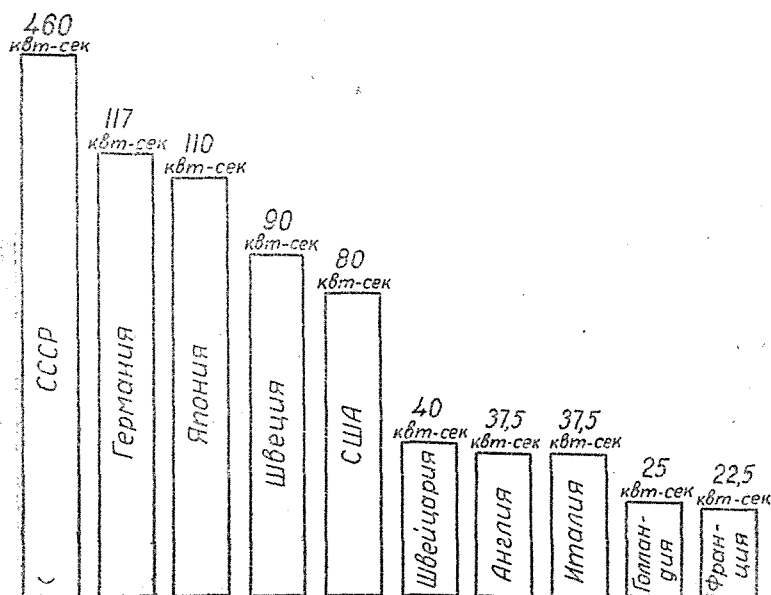
Дальнейшее развитие техники высоких напряжений привело к расширению области применения импульсных генераторов высокого напряжения. В настоящее время они используются в физических лабораториях при изучении физики атомного ядра, в медицинских лабораториях для терапевтических целей, в нефтяной промышленности для удаления некоторых нефтяных эмульсий, в магнитной дефектоскопии для импульсного намагничивания, в импульсной рентгенографии, в радиолокационных установках, в установках для получения импульсного света и других устройствах специального назначения.

За тридцать лет с начала конструирования технических установок импульсного напряжения созданы десятки генераторов с амплитудой импульса напряжения в несколько миллионов вольт. Рост амплитуды импульса наглядно иллюстрируется следующим примером: первый генератор импульсов, сооруженный инж. Баклиным, мог дать искру длиной в 15 см, современные же генераторы дают мощную искру длиной до 2000 см.



Фиг. 1. Сравнение крупнейших построенных генераторов по максимальной амплитуде импульса напряжения.

Успехи отечественного высоковольтного аппаратостроения и конденсаторостроения позволили создать в нашей стране еще в довоенное время целый ряд уникальных импульсных генераторов напряжением в несколько миллионов вольт. Из фиг. 1 и 2 можно видеть, что генераторы, по-



Фиг. 2. Сравнение крупнейших построенных генераторов по величине запасаемой энергии.

строенные в СССР, имеют наиболее высокие электрические характеристики. Самая крупная установка, дающая амплитуду импульса в 8,4 млн. в по отношению к земле [2], была построена в 1940 г. в Харьковском электротехническом институте (ХЭТИ).

Основные исследования в области импульсных генераторов высокого напряжения посвящены анализу влияния параметров цепи разряда генератора R , L и C на форму волны импульса напряжения и связаны с получением стандартных импульсов для испытания изоляции. Можно отметить, что, несмотря на большое количество данных о построенных импульсных генераторах, в настоящее время не только отсутствует инженерный расчет, связывающий электрический расчет с конструкцией генератора, но и нет никаких систематических исследований, обобщающих результаты конструирования генераторов. В технической литературе имеется лишь описание отдельных построенных установок и их узлов. Настоящая работа имеет целью анализ конструкций крупнейших генераторов, построенных как у нас, так и в других странах, и является первым шагом к выяснению технико-экономических условий рационального конструирования генераторов. Анализ технико-экономических характеристик также кажется своевременным в связи с расширяющейся с каждым годом областью применения генераторов высокого импульсного напряжения. В приводимой таблице 1 собраны основные опубликованные данные о крупнейших импульсных установках, построенных за прошедшие годы.

Основные электрические параметры импульсного генератора

Основными электрическими параметрами импульсного генератора высокого напряжения являются следующие величины:

1. Максимальная амплитуда импульса напряжения, определяемая

$$U_{\text{макс}} = U_0 \cdot n_0 \cdot \eta,$$

где U_0 — напряжение, до которого заряжается конденсаторная группа, в (кВ),
 n_0 — количество конденсаторных групп,
 η — коэффициент использования.

На фиг. 3 представлено изменение максимальной амплитуды импульса напряжения по годам сооружения генераторов.

2. Разрядная емкость генератора или емкость в ударе, определяемая

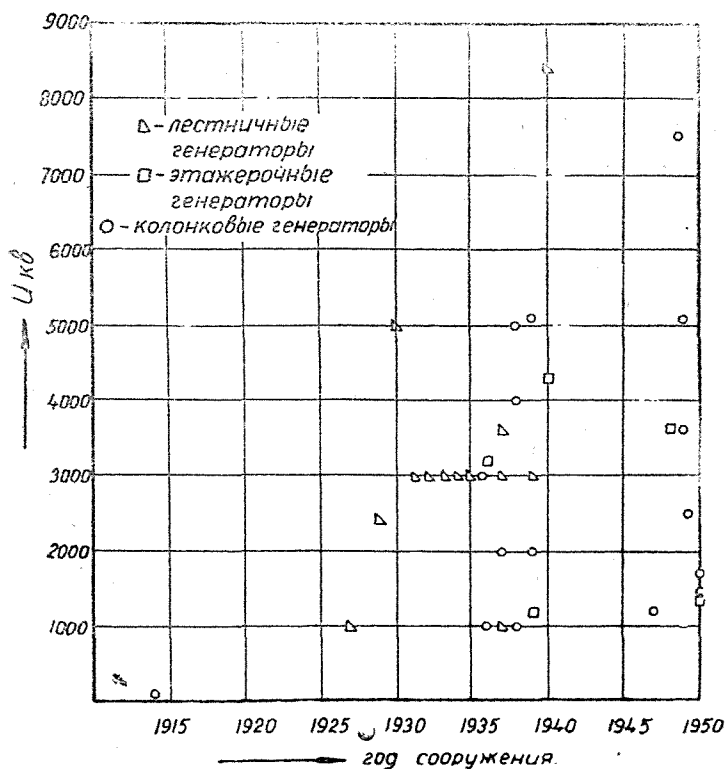
$$C_{\text{уд}} = \frac{C_0}{n_0},$$

где C_0 — емкость одной конденсаторной группы (в пикофарадах),
 n_0 — количество конденсаторных групп.

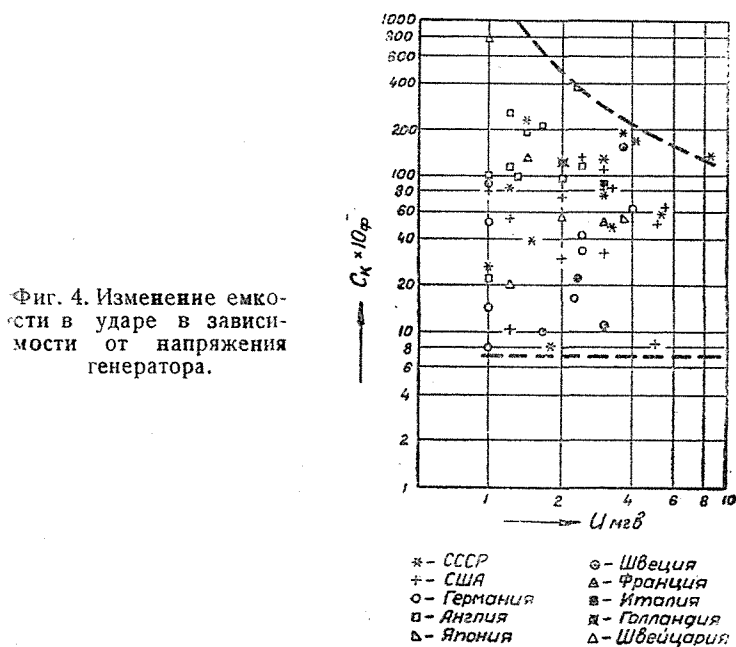
На фиг. 4 приведено изменение емкости в ударе с максимальной амплитудой импульса напряжения для построенных генераторов по опубликованным данным. Основные генераторы имеют емкость в ударе порядка нескольких тысяч пикофард. С ростом максимальной амплитуды емкость в ударе снижается, так как величина емкости и рабочего напряжения одного конденсатора ограничена, а увеличение амплитуды импульса связано с увеличением количества конденсаторов, находящихся в последовательном соединении при разряде генератора. Генераторы, имеющие более высокую емкость в ударе, позволяют выполнять испытания стандартной волной изоляции крупных высоковольтных установок, представляющих большую нагрузку для генератора.

3. Количество энергии, запасаемой в генераторе,

$$W_{\Gamma} = \frac{C_{\text{уд}} U_{\text{макс}}^2}{2},$$



Фиг. 3. Изменение максимальной амплитуды импульса напряжения по годам сооружения для построенных импульсных генераторов.



Фиг. 4. Изменение емкости в ударе в зависимости от напряжения генератора.

где $C_{уд}$ — емкость генератора в ударе в $пкф$.

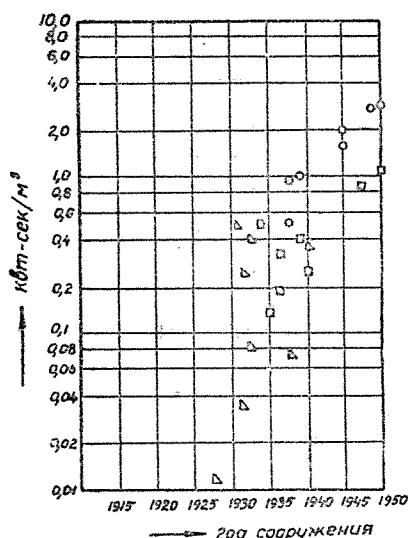
$U_{макс}$ — максимальная амплитуда импульса напряжения в $кв$. На фиг. 2 приведены значения энергии при разряде для крупнейших построенных импульсных генераторов.

Значения указанных электрических параметров (амплитуды импульса напряжения, емкости в ударе и запасаемой энергии) определяются областью применения генератора импульсов.

Удельные технико-экономические характеристики

Сооружение любой установки должно быть оправдано не только технически, но и экономически, поэтому целесообразно связать электрические параметры генератора с его строительными данными: объемом, высотой и площадью застройки, которые определяют затраты на сооружение генератора, помещений и эксплуатацию установки.

Введение таких характеристик даст возможность более полного анализа и сравнения различных конструкций импульсных генераторов и поможет указать пути создания новых малогабаритных генераторов с высокими электрическими параметрами. В качестве характеристик предполагаются следующие удельные условные величины.



Фиг. 5. Изменение удельной энергии в $квт \cdot сек / м^3$ в зависимости от года сооружения.

1. Удельная энергия

Степень технического совершенства конденсатора характеризуется величиной энергии, запасаемой в единице объема, так как основной частью генератора являются конденсаторы, целесообразно для него применить понятие удельной энергии, измеряемой в $квт \cdot сек / м^3$.

$$K_1 = \frac{W_{\Gamma}}{V_{\Gamma}}$$

где W_{Γ} — запасаемая генератором энергия в $квт \cdot сек$,
 V_{Γ} — строительный объем генератора в $м^3$.

На фиг. 5 представлено изменение коэффициента K_1 в зависимости от года сооружения генераторов.

2. Средний градиент напряжения по строительной высоте генератора

Конструкцию импульсного генератора можно также охарактеризовать средним градиентом напряжения по высоте генератора. Для того чтобы при работе генератора искра проходила не по произвольному пути, необходимо, чтобы средний градиент при разряде был ниже разрядного градиента в воздухе на импульсном напряжении. Величина среднего градиента напряжения по строительной высоте генератора будет определять степень использования воздушной изоляции, а также будет зависеть от конструкции и расположения конденсаторов. Средний градиент определяется, как

$$K_2 = \frac{U_{макс}}{H_{\Gamma}}$$

где $U_{\text{макс}}$ — максимальная амплитуда импульса напряжения в кв,
 H_r — строительная высота генератора в м.

3. Коэффициент — K_3

Для ориентировочной оценки изменения объема генератора с увеличением максимальной амплитуды импульса напряжения необходимо ввести удельную величину, равную количеству кв амплитуды напряжения, приходящихся на единицу строительного объема генератора,

$$K_3 = \frac{U_{\text{макс}}}{V_r}.$$

4. Коэффициент использования строительного объема генератора — K_4

Данная величина характеризует компактность всей установки и степень использования строительного объема, равна отношению удельных энергий генератора и конденсатора и выражает, какую часть от всего строительного объема генератора занимает суммарный объем конденсаторов

$$K_4 = \frac{K_1}{K_0} \cdot 100\%,$$

где K_1 — удельная энергия генератора в квт·сек/м³,

K_0 — удельная энергия одной конденсаторной группы в квт·сек/м³.

Так как $K_0 = \frac{C_0 U_0^2}{2} \cdot \frac{1}{V_0}$, где C_0 , V_0 , U_0 относятся к конденсатор-

ной группе,

$$\text{тогда } K_4 = \frac{C_{уд} U_{\text{макс}}^2}{2} \frac{2 V_0}{C_0 U_0^2} = \frac{C_0 U_0^2 n_0^2 \eta^2 V_0}{n_0 C_0 U_0^2 V_r} \cdot 100\%$$

$$\text{или окончательно } K_4 = \frac{V_0 n_0}{V_r} \cdot \eta^2 \cdot 100\%.$$

На фиг. 6 представлено изменение коэффициента использования строительного объема по годам для генераторов различной конструкции.

Необходимо подчеркнуть, что каждый параметр импульсного генератора характеризует установку односторонне; лишь сравнение и анализ всех параметров и предложенных удельных характеристик дает полное представление об установке.

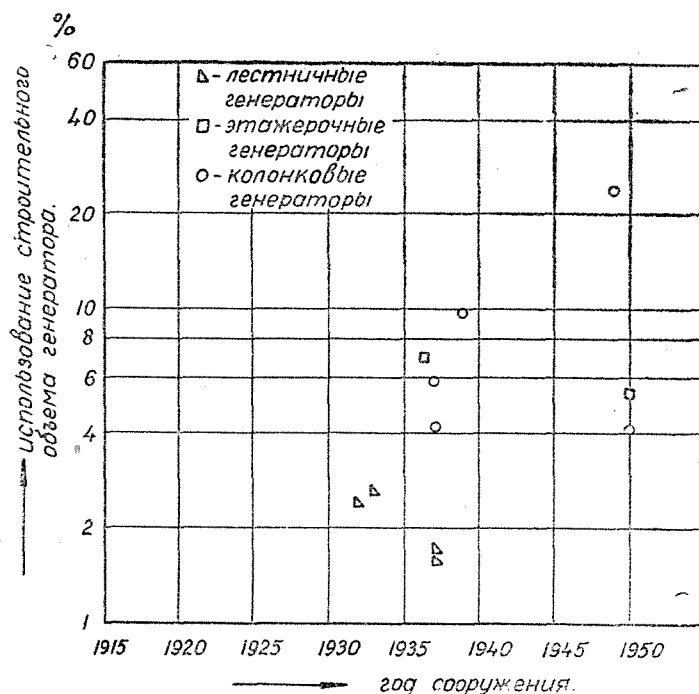
Исследование конструкций импульсных генераторов

По конструктивному исполнению импульсные генераторы высокого напряжения очень просты и могут быть классифицированы следующим образом:

- а) одноконденсаторные генераторы,
- б) генераторы лестничного типа,
- в) генераторы этажерочного типа,
- г) генераторы колонкового типа.

Кроме того, все генераторы можно разделить на стационарные и передвижные, на установки, построенные для работы в закрытом помещении

и на открытом воздухе. Каждый импульсный генератор можно охарактеризовать количеством ступеней умножения напряжения и типом использованного конденсатора. Для импульсных генераторов применяются в основном два типа конденсаторов: а) с металлическим кожухом и вводом, б) с изолирующим цилиндрическим кожухом.



Фиг. 6. Изменение коэффициента использования строительного объема по годам сооружения для некоторых построенных импульсных генераторов.

Иногда в качестве конденсаторов используют катушки высоковольтного кабеля, применение которых впервые предложено проф. А. М. Залесским.

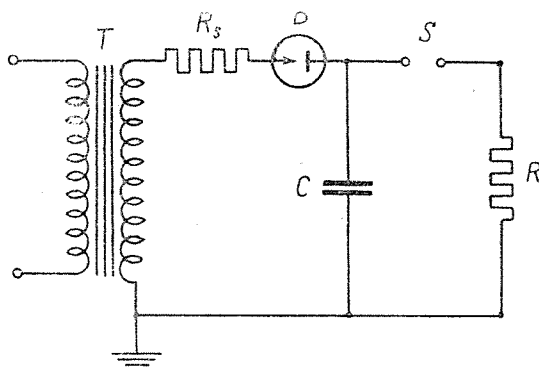
1. Одноконденсаторные генераторы

Основными элементами конструкции импульсного генератора являются конденсаторы, сопротивления и искровые промежутки. Простейший генератор (фиг. 7) состоит из конденсатора C , питаемого от зарядного трансформатора T через защитное сопротивление R_z и выпрямитель B . При пробое искрового промежутка S конденсатор разряжается на сопротивление R .

Одноконденсаторная схема генератора отличается простотой регулировки амплитуды и формы импульса напряжения, малыми значениями паразитной емкости и внешней индуктивности контура. Амплитуда импульса напряжения в такой схеме ограничивается рабочим напряжением конденсатора и обычно не превосходит 300—400 кв. Вследствие указанных качеств такая простейшая конструкция генератора делается временной, разборной и используется для исследовательских работ по пробоем газов, жидкостей и образцов из твердого диэлектрика и для других лабораторных целей.

2. Генераторы лестничного типа

Генераторы лестничного типа состоят из деревянного или дерево-металлического ступенчатого каркаса с фарфоровой изоляцией между ступенями и землей. На ступенях каркаса размещаются конденсаторы, обычно в два ряда, иногда параллельными группами по несколько штук. Лестничная конструкция может быть 1-маршевой, 2-маршевой и 3-маршевой. Установки, работающие на открытом воздухе, обычно имеют один марш, а установки, работающие внутри здания, 2—3 марша, так как площадь пола в высоковольтном зале ограничена.



Фиг. 7. Схема простейшего импульсного генератора.

Генераторы лестничного типа в первые годы построения импульсных установок были наиболее часто применяемой конструкцией и строились до 1940 года. На фиг. 3 можно видеть, что основные установки лестничного типа построены в период с 1930 г. по 1940 г., в том числе 7 генераторов на 3 млн. вольт и один на 8,4 млн. вольт с самой большой энергией, выделяемой при разряде.

Значение удельной энергии для лестничных генераторов сравнительно невелико и равняется от 0,01 до 0,5 квт-сек/м^3 . Малая величина удельной энергии обусловлена степенью использования строительного объема, большим „подлестничным“ объемом. Коэффициент использования строительного объема мал и составляет 1,6—2,8%.

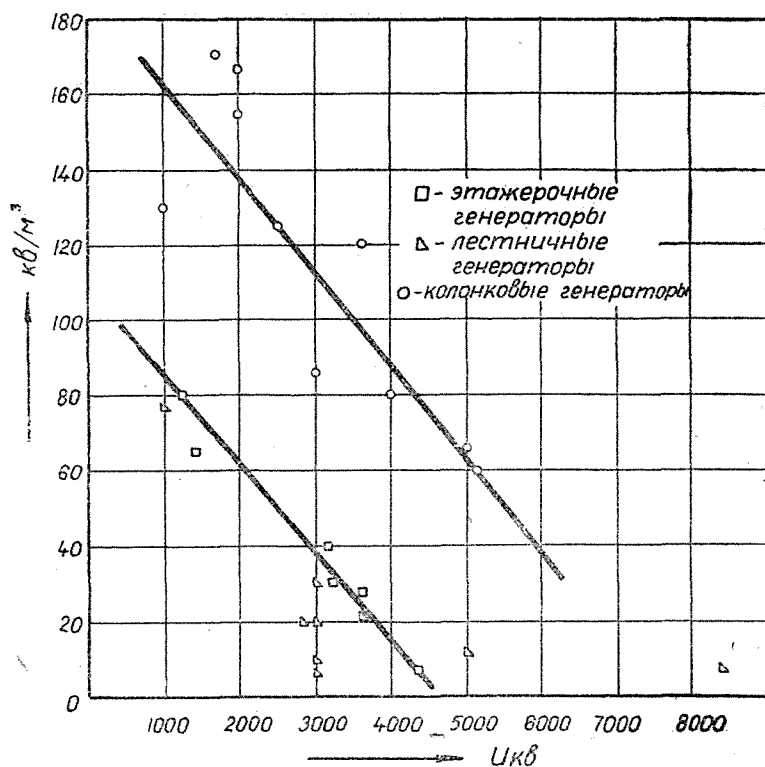
На фиг. 8 представлен график изменения коэффициента K_3 в кв/м^3 с ростом амплитуды импульса напряжения для построенных генераторов различных типов. Уменьшение K_3 с ростом $U_{\text{макс}}$ показывает, что объем генератора лестничного типа возрастает не пропорционально амплитуде импульса, а гораздо быстрее. Степень возрастания объема можно выразить эмпирической зависимостью $K_3 = A - BU_{\text{макс}}$

или, так как $K_3 = \frac{U_{\text{макс}}}{V_T}$, то можно написать, что

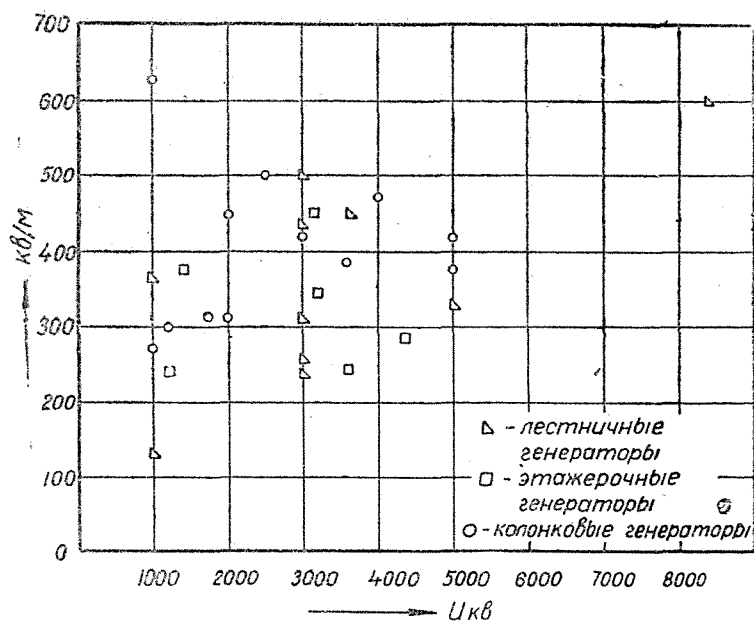
$$V_T = \frac{U_{\text{макс}}}{A - BU_{\text{макс}}}, \text{ где } A = 30, \quad B = 0,002, \quad U_{\text{макс}} \text{ в кв.}$$

На фиг. 9 представлено изменение коэффициента K_2 в кв/м —

среднего градиента напряжения по строительной высоте генератора с ростом амплитуды импульса напряжения для построенных генераторов. Высокие значения градиента, до 600 кв/м , для генераторов лестничного типа обусловлены хорошим использованием воздушной изоляции, так как в отличие от других конструкций общая строительная высота лестничного ге-



Фиг. 8. Изменение коэффициента K_3 кВ/м³ в зависимости от амплитуды импульса напряжения для построенных импульсных генераторов.



Фиг. 9. Изменение коэффициента K_2 в кВ/м в зависимости от амплитуды импульса напряжения для построенных импульсных генераторов.

нератора не включает сумму высот каждого конденсатора. Внешняя индуктивность вследствие значительной длины пути разряда имеет порядок сотен микрогенри.

Паразитная емкость между ступенями мала по сравнению с емкостью ступеней на землю.

В настоящее время генераторы лестничного типа для работы в закрытых помещениях уже не строятся вследствие значительных габаритов и низких удельных характеристик; их заменили конструкции этажерочного и колонкового типа.

Для создания же наружной установки сверхвысокого напряжения и большой энергии лестничная конструкция может быть использована и сейчас, так как имеет большую механическую устойчивость по сравнению с этажерочными генераторами и большую емкость в ударе по сравнению с колонковыми генераторами.

3. Генераторы этажерочного типа

Генераторы этажерочного или башенного типа имеют каркас в виде этажерки, на полках которой расположены конденсаторы. Каркас выполняется из деревянных или металлических рам, разделенных фарфоровыми опорными изоляторами. Конденсаторы располагаются друг над другом или по винтовой линии. В последнем случае строительная высота генератора получается ниже. Количество полок может исчисляться десятками и ограничивается механической устойчивостью и высотой помещения, так как этажерочные генераторы в основном строятся для работы в закрытом помещении. Генераторы этажерочного типа начали строиться позже лестничных (фиг. 3). Самый большой генератор этажерочного типа построен в 1940 году в Ленинградском политехническом институте — амплитуда 4,3 млн. вольт и энергия в разряде 155 *квт·сек*.

Удельная энергия в этажерочных генераторах имеет более высокие значения, чем у генераторов лестничного типа, и находится в пределах от 0,2 до 1,2 *квт·сек/м³*. Коэффициент использования строительного объема у генераторов этажерочного типа выше, чем у генераторов лестничного типа, и достигает 4 ÷ 7%. Объем генератора возрастает с ростом амплитуды импульса непропорционально. Эмпирическое выражение, связывающее объем генератора с максимальной амплитудой импульса, имеет такой же вид, что и для лестничных генераторов:

$$V = \frac{U_{\max}}{A - B U_{\max}},$$

где $A = 110$, $B = 0,025$, где объем в м^3 , а амплитуда напряжения в *кв*. Невысокие значения среднего градиента напряжения по строительной высоте генератора, равные 250 ÷ 350 *кв/м* (фиг. 9), обусловлены тем, что в строительную высоту входит суммарная высота конденсаторов,

$$H_{\Gamma} = \Sigma h_{из} + \Sigma h_{к},$$

где $h_{из}$ — высота межконденсаторного пространства,

$h_{к}$ — высота конденсатора, лежащего на полке,

H_{Γ} — строительная высота генератора,

а также значительной неравномерностью электрического поля в межконденсаторном пространстве. Внешняя индуктивность самого крупного генератора (ЛПИ на 4,3 млн. в) равна 170 *мкгн*, а паразитная емкость равна 250 *пкф*.

Можно отметить, что импульсные генераторы этажерочного типа являются наиболее распространенными стационарными установками для ра-

боты в закрытых помещениях при амплитудах импульса до 1 ÷ 2 млн. в. Конструкция генератора отличается простотой и может быть применена для временных импульсных установок, когда требуется увеличение емкости в разряде за счет снижения амплитуды импульса напряжения. Выравнивание электрического поля между конденсаторами позволит уменьшить габариты установки.

4. Генераторы колонкового типа

Возрастающие требования к импульсным генераторам в отношении высоких строительных и электрических характеристик привели к созданию генераторов колонкового типа. Простейшей конструкцией такого генератора является одноконковый импульсный генератор, состоящий из поставленных друг на друга бумажных и фарфоровых цилиндров. Внутри цилиндров, наполненных маслом, находятся плоские конденсаторные элементы, соединенные в параллельные и последовательные группы.

Эксплуатационные неудобства—затруднительность ремонта и текущего наблюдения за конденсаторами—привели к созданию 2, 3, 4 и 6-конковых генераторов. В многоконковых генераторах конденсаторные элементы образуют самостоятельную единицу и располагаются друг над другом, будучи разделены изолирующими цилиндрами того же диаметра, что и конденсаторы. Цилиндры изготавливаются либо из лакированной прессованной бумаги, либо из фарфора. Фарфоровые цилиндры можно брать приблизительно на 15% короче бумажных для одного и того же напряжения, но технология изготовления фарфоровых гораздо сложнее. Для компактности и однообразного вида элементы зарядного устройства, трансформаторы накала выпрямителей и некоторые другие элементы также помещают внутрь цилиндров, заполненных маслом.

Колонковые генераторы начали строиться со второй половины 30-х годов XX века (фиг. 3). Много генераторов на напряжения 2—3 млн. вольт построено уже в послевоенный период. Самый большой генератор колонкового типа построен в 1939 г. и имеет амплитуду импульса в 5,1 млн. вольт по отношению к земле, а при зарядке конденсаторов до испытательного напряжения—в 7,5 млн. вольт. Удельная энергия генераторов имеет значения, приближающиеся к удельной энергии конденсаторов, и равна $1 \div 3 \text{ квт}^1 \cdot \text{сек}/\text{м}^3$. О значительном совершенстве колонковых конструкций говорят и высокие значения коэффициента использования строительного объема. Для построенных генераторов он достигает 25% (фиг. 6). Изменение объема с ростом амплитуды импульса напряжения может быть описано эмпирической формулой, присущей всем типам импульсных генераторов:

$$V = \frac{U_{\text{макс}}}{A - B U_{\text{макс}}},$$

где $A = 180$, $B = 0,025$, V — в м^3 , а $U_{\text{макс}}$ — в кв.

Значения градиента напряжения по строительной высоте генератора находятся в пределах $300 \div 500 \text{ кв}/\text{м}$ и указывают на эффективное использование изоляционной поверхности опорных цилиндров. Паразитная емкость каждой ступени по отношению к земле незначительна. Внешняя индуктивность также меньше для колонковых конструкций за счет короткого пути разряда и зависит от расположения колонн в общем объеме зала и числа ступеней в колоннах.

Генераторы колонкового типа в настоящее время являются наиболее совершенной конструкцией. Все современные импульсные генераторы с амплитудой импульса выше миллиона вольт строятся колонкового типа. Компактность генераторов позволяет применить их как для стационарной

работы в закрытых помещениях, так и для работы на открытом воздухе в качестве передвижных установок.

Общие замечания и выводы

Технический уровень высоковольтного конденсаторостроения определяет совершенство конструкций генератора импульсов напряжения, так как его основной частью являются конденсаторы высокого напряжения.

Первые импульсные генераторы всех конструкций имели низкие характеристики, так как строились на основе косинусных конденсаторов—специальных конденсаторов для импульсных схем высокого напряжения в то время еще не было. С ростом совершенства высоковольтных конденсаторов (с увеличением удельной энергии в единице объема, с увеличением рабочих градиентов, с разработкой специальных конструктивных типов и т. п.) резко улучшались конструкции импульсных генераторов. Возрастание рабочего напряжения конденсаторов привело к увеличению зарядного напряжения ступени генератора. Современные генераторы имеют зарядное напряжение ступени, достигающее 400 кВ (табл. 1). Рост зарядного напряжения приводит к снижению числа ступеней, последнее же связано с уменьшением индуктивности контура и увеличением емкости в ударе,—и то и другое желательно.

Индуктивность контура определяется индуктивностью конденсаторов, сопротивлений и подводящих проводов и может быть оценена на основе следующих формул:

а) индуктивность двух параллельных проводов длиной l см, диаметром d см и расстоянием между осями D см равна:

$$L_1 = 0,004 \, l \left(2,303 \log \frac{2D}{d} - \frac{D}{l} + \frac{1}{4} \text{ мкгн} \right);$$

б) индуктивность квадрата со сторонами в a см и квадратным сечением провода $\alpha \times \alpha$ см² равна:

$$L_1 = 8a \left(\ln \frac{a}{\alpha} + 0,447 \frac{\alpha}{a} + 0,033 \right) \cdot 10^{-3} \text{ мкгн};$$

в) индуктивность одного конденсатора колеблется в пределах от 0,01 до 3,5 мкгн.

Из всех конструктивных типов импульсных генераторов наибольшее развитие получили генераторы колонкового типа, которые в настоящее время обладают наиболее высокими электрическими и строительными характеристиками. С увеличением емкости конденсаторов в изолирующем цилиндрическом кожухе, а в настоящее время удельная энергия в них ниже, чем в конденсаторах с металлическим кожухом и вводом, колонковые генераторы будут единственной практической конструкцией для получения импульсного напряжения в несколько миллионов вольт.

Вследствие значительных успехов в конденсаторостроении и аппаратостроении в настоящее время можно строить компактные генераторы с различной амплитудой и энергией импульса. Максимальные электрические параметры и габариты современного импульсного генератора весьма высокого напряжения можно приближенно оценить следующим образом: наиболее реальной конструкцией представляется многоколонковый генератор (8—10 параллельных колонн), так как с ростом числа колонн повышается механическая устойчивость генератора и его емкость в ударе. Опыт эксплуатации многоступенчатых генераторов показал, что максимальное количество ступеней умножения напряжения ограничивается цифрой порядка 50. Исходя из величины рабочего напряжения современного конденсатора в

Таблица 1

Основные данные о построенных импульсных генераторах высокого напряжения с амплитудой импульса более миллиона вольт

№ пп	Страна и наименование установки	Максимальная амплитуда импульса напряжения	Емкость в ударе	Запасаемая энергия	Строительная высота генератора	Строительный объем генератора	Удельная энергия генератора	Строительный средний градиент напряжения по высоте генератора	Количество конденсаторов в одной группе	Количество конденсаторных групп	Рабочее напряжение конденсатора	Емкость одного конденсатора	Объем конденсатора	Запасаемая энергия в конденсаторе	Удельная энергия конденсатора	Коэффициент использования строительного объема генератора	Коэффициент k_3	Тип конденсатора	Конструктивный тип генератора	Год сооружения генератора	Литературный источник
		U_{\max}	$C_{уд}$	W_2	H_2	V_2	$k_1 = \frac{W_2}{V_2}$	$k_2 = \frac{U_{\max}}{H_2}$	a_0	n_0	U_k	C_k	V_k	W_k	$k'_1 = \frac{W_k}{V_k}$	$k_4 = \frac{k_1}{k'_1}$	$k_3 = \frac{U_{\max}}{V_2}$				
		кв	пкф	квт-сек	м	м³	квт-сек/м³	кв/м	—	—	кв	мкф	м³	квт-сек	квт-сек/м³	%	кв/м³				
1	Россия, генератор инж. Баклина	120	100	0,001	—	—	—	—	—	—	—	0,0008	—	—	—	—	—	Лейденская банка	—	1914	4
2	СССР, ЭФИ	1800	800	1,3	6,0	40	0,033	300	1	14	135	0,0112	—	—	—	—	45,0	Кабель	—	1931	1
3	СССР, ЛЭМИ	1500	3800	4,16	4,0	50	0,083	375	1	9	165	0,033	0,12	0,45	3,75	2,2	30,0	"	—	1933	1
4	СССР, ХЭТИ	3000	12500	56,0	6,0	144,0	0,39	500	1	40	75	0,5	0,097	1,4	14,5	2,68	20,8	ХЭТИ	Лестница	1933	5
5	СССР, ЛЭТИ	3200	4700	24,0	9,3	125,0	0,192	345	1	32	100	0,15	0,265	0,75	2,83	6,9	25,6	"Буревестник"	Этажерка	1936	6
6	СССР, ВЭИ	3000	7500	34,0	9,7	443,0	0,077	310	1	80	75	0,15	0,1	0,42	4,2	1,8	7,5	КСМ-75 М.Т.З.	Двухмаршевая лестница	1937	2
7	СССР, УФТИ	5000	5700	71,5	12,0	75,0	0,95	416	10	10	50,0	0,17	—	—	—	—	66,7	"	Одна колонна	1938	11
8	СССР, УФТИ	1000	2600	1,3	1,6	2,4	0,54	625	1	25	40,0	0,065	—	—	—	—	410,0	Плоские конденсаторные элементы в масле	Колонка	1938	
9	СССР, ЛИИ, БКР	1200	8300	6,0	5,0	15,0	0,4	240	1	12	150	0,1	—	—	—	—	80,0	Метал. кожух с вводом	Этажерка	1939	12
10	СССР, ЛПИ	4300	16700	155,0	15,0	635,0	0,244	286	1	43	100	0,72	—	—	—	—	7,16	Метал. кожух с вводом	Этажерка	1940	7
11	СССР, ХЭТИ	8400	13200	460,0	14,0	1200	0,38	600	1	82	100	1,03	—	—	—	—	7,0	ХЭТИ	Лестница	1940	8
12	СССР, ЭНИИН	3600	18200	118,0	14,7	132	0,89	245	1	33	150	0,6	—	—	—	—	27,3	"	Этажерка	1948	3
13	СССР, ТПИ	1400	23500	23,0	3,75	20,0	1,15	373	1	12	120	0,28	0,094	2,0	21,5	5,25	70,0	"	"	1950	13
14	США, Питсфилд	2x5100	6500	82,5	13,4	85,0	1,0	375	3	17	100	0,33	0,196	1,65	8,3	12,0	60,0	Герколитовый цилиндр	6 колонн	1939	14
15	США, Питсфилд	2x5000	5000	62,5	15,0	200,0	0,156	333	—	—	—	—	—	—	—	—	12,5	Метал. кожух с вводом	Лестница	1930	19
16	США, Питсфилд	3000	11000	50,0	7,0	100	0,5	428	6	20	—	—	—	—	—	—	30,0	"	Лестница	1931	19
17	США, Шарон	3000	8000	36,0	12,2	149,0	0,24	246	4	30	50	0,24	0,03	0,3	10,0	2,4	20,0	"	Лестница в 3,5 марша	1932	17
18	США, Траффорд	3000	3300	15,0	—	—	—	—	5	30	20,0	0,5	—	—	—	—	—	"	Лестница	1934	1
19	США, Барбертон	2000	3000	6,0	—	—	—	—	1	1	2000	0,0003	—	—	—	—	—	Воздушный	—	1929	1
20	США, Огайо, Брасс	3150	7850	39,0	7,01	78,5	0,5	450	2	21	75	0,33	—	—	—	—	40,0	Метал. кожух с вводом	Винтовая этажерка	1934	2
21	США, Виттон	2500	12500	40,0	5,0	20,0	2,0	500	1	16	160	0,2	—	—	—	—	125	Бумажный цилиндр	4 колонны	1949	20
22	США, Вестингауз	1000	8300	4,15	7,8	340	0,012	128	3	20	17,0	0,5	0,01	0,0725	7,25	0,17	2,94	Метал. кожух с вводом	Лестница	1927	16
23	США	5000	850	14,0	—	—	—	—	—	4	—	—	—	—	—	—	—	"	"	1929	1
24	США, Вестингауз	2000	7000	14,0	—	—	—	—	1	20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	32
25	США, Питсфилд	1200	1000	1,125	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	31
26	США, Вест-Лафайет	1200	5200	3,75	—	—	—	—	1	48	25,0	0,25	—	—	—	—	—	—	—	1934	32
27	США, Вестингауз	200	100000	2,0	2,5	25,0	0,04	80,0	4	2	20,0	0,8	—	—	—	—	8,0	Метал. кожух с вводом	—	1923	18
28	Германия	4000	6250	50,0	8,5	42,5	1,18	470	—	16	—	—	—	—	—	—	80,0	Плоские шайбы	Колонка	1938	9

№ пп	Страна и наименование установкн	Максимальная амплитуда импульса напряжения	Емкость в ударе	Запасаемая энергия	Строительная высота генератора	Строительный объем генератора	Удельная энергия генератора	Строительный средний градиент напряжения по высоте генератора	Количество конденсаторов в одной группе	Количество конденсаторных групп	Рабочее напряжение конденсатора	Емкость одного конденсатора	Объем конденсатора	Запасаемая энергия в конденсаторе	Удельная энергия конденсатора	Коэффициент использования строительного объема генератора	Коэффициент k_3	Тип конденсатора	Конструктивный тип генератора	Год сооружения генератора	Литературный источник	
		$U_{\text{макс}}$	$C_{\text{уд.}}$	W_z	H_z	V_z	$k_1 = \frac{W_z}{V_z}$	$k_2 = \frac{U_{\text{ср}}}{H_z}$	a_0	n_0	U_k	C_k	V_k	W_k	$k_1' = \frac{W_k}{V_k}$	$k_4 = \frac{k_1}{k_1'}$	$k_3 = \frac{U_{\text{макс}}}{V_z}$					
29	Германия, Сименс-Шукерт, Нюрнберг	3000	9000	42,0	12,0	315,0	0,133	250	4	15	—	0,14	—	—	—	—	9,5	Метал. кожух с вводом	Лестница в 3 марша	1935	21	
30	Германия, Розенталь	2200	1450	3,5	18,0	360	0,01	122	20	8	125,0	—	—	—	—	—	6,1	Мееровского		1930	1	
31	Германия	2400	4400	13,75	—	—	—	—	20	12	40,0	0,066	—	—	—	—	—	"		1929	1	
32	Германия	1000	5000	2,5	3,7	7,7	0,325	270	—	1	—	—	—	—	—	—	130	Плоские шайбы	Колонка	1936	27	
33	Германия	3000	1100	4,95	7,0	35,0	0,143	430	12	4	—	—	—	—	—	—	86,0	"	"	1936	10	
34	Германия, Хермслорф	2×1000	800	1,6	—	—	—	—	12	4	170	0,01	—	—	—	—	—	Мееровского	"		1	
35	Германия, Фелтон	2×700	120000	117,5	—	—	—	—	1	2	700	0,2	—	—	—	—	—	Кабель	Два кабельных барабана	1946	32	
36	Германия, Нюрнберг	1000	14000	7,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—				32	
37	Германия	1700	1000	1,44	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—				32	
38	Германия	2300	3500	9,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—				32	
39	Англия, Манчестер	2000	10000	20,0	6,5	12,0	1,66	310	2	12	170	0,06	0,088	0,83	9,5	5,7	166	Бумажные цилиндры Мееровского	4 колонны	1937	22	
40	Англия, Манчестер	1000	2200	1,1	—	—	—	—	1	4	250	0,0055	—	—	—	—	—	Бумажные цилиндры	Этажера	1930	23	
41	Англия, Чарльтон	1700	21000	30,0	5,5	10,0	3,00	310	2	6	142	0,255	0,035	2,55	73	4,1	170	Бумажные цилиндры	2 колонны	1950	25	
42	Англия, Хейнлей	1200	25000	17,0	4,0	6,0	2,85	300	2	7	167	0,0875	—	—	—	—	200	Фарфоровые цилиндры	4 колонны	1947	26	
43	Англия, Литтерхед	1400	20000	19,6	—	—	—	—	1	8	175	0,16	—	—	—	—	—		Колонны		1950	24
44	Англия	2500	12000	37,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—				32	
45	Англия	1300	10000	8,45	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—				32	
46	Англия	1200	11000	7,95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—				32	
47	Англия	1000	10000	5,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—				32	
48	Япония, Токио	3600	5400	35,0	8,0	160	0,218	450	1	48	75,0	0,259	0,056	0,732	13,1	1,67	22,6	Метал. кожух с вводом	Лестница	1937	28	
49	Япония, Танаши	2400	38200	110,0	—	—	—	—	1	16	150	2,0	—	—	—	—	—	—			1940	29
50	Япония, Токио	1000	10000	5,0	2,7	13,0	0,384	370	1	20	50	2,0	—	—	—	—	77		Лестница		1937	28
51	Швеция	3600	14000	90,0	9,5	30,0	3,0	385	1	9	400	0,126	0,8	10,0	12,5	24,0	120		Колонна		1949	32
52	Швеция	2300	2200	5,82	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—				32
53	Швеция	1000	8500	4,25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—				32
54	Франция, Лаб. Ампера	3300	5000	22,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—				32
55	Италия, Социета Матрини	3000	8330	37,5	—	—	—	—	1	30	110	0,25	—	—	—	—	—	—		Лестница в 3 марша	1939	30
56	Голландия, Эйндховен	2000	125,0	25,0	4,5	13,0	1,9	445	1	10	200	0,125	0,052	2,5	48	4,0	154	Цилиндры	4 колонны	1939	21	
57	Швейцария	2000	5800	11,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—				32
58	Швейцария	1400	12000	11,75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—				32
59	Швейцария	1200	2000	1,44	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—				32
60	Швейцария, Бергер и Шнебергер	1000	80000	40,0	—	—	—	—	1	3	350	0,245	—	—	—	—	—	Кабель		1933	32	
61	Англия, Вудвич	1575	17750	22,0	5,0	30,0	0,735	315	1	9	175	0,16	0,33	2,45	7,45	10,0	52,0	Цилиндры	4 колонны	1954	34	

400 кВ, максимальная амплитуда может быть приближенно оценена равной 20 млн. вольт по отношению к земле.

Конденсатор с $U=400$ кВ имеет емкость в 0,13 мкф при высоте $H=1$ м и диаметре $D=0,75$ м.

Так как желательно иметь 8—10 колонн, то вероятно параллельное соединение двух конденсаторов, и тогда емкость в ударе

$$C_{уд.} = \frac{0,13 \cdot 2}{50} \cdot 1000 = 5000 \text{ пкф}$$

и запасаемая энергия

$$W = \frac{5000 \cdot 20^2}{2} = 1000000 \text{ вт/сек.}$$

Приняв средний градиент напряжения по строительной высоте равным 500 кВ/м, получим $H_T=40$ м и, взяв основание приближенно 5×5 м², получим объем генератора $V_T=1000$ м³.

При сооружении двух генераторов противоположной полярности возможно получение импульсного напряжения в 40 млн. вольт.

Выводы

1. Импульсные генераторы высокого напряжения, работающие по искровому методу, предложенному проф. В. К. Аркадьевым, с каждым годом находят все более и более разностороннее применение в технике.

2. Установки, построенные в Советском Союзе, имеют наиболее высокие электрические параметры.

3. Все конструктивные типы импульсных генераторов претерпели значительное развитие, и их технико-экономические характеристики улучшились. Наибольшее развитие получил генератор колонкового типа.

4. Необходимо разработать специальную удобную для монтажа конструкцию импульсного конденсатора высокого напряжения с высокими удельными характеристиками.

5. Предложенные технико-экономические удельные характеристики дают возможность более конкретного и более полного сравнения конструкций импульсных генераторов.

6. При современном уровне развития техники практически возможно создание генератора с максимальной амплитудой импульса напряжения в 20 млн. вольт по отношению к земле и энергией в разряде порядка 1000 кВт/сек.

В заключение выражаю благодарность профессору Воробьеву А. А. за предложение темы и руководство настоящей работой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Залесский А. М., Сорокин А. В., Стефанов К. С. Руководство к работам в лаборатории высокого напряжения. Изд. КУБУЧ, 1934.

2. Техника высоких напряжений. В. 2, Госэнергоиздат, 1939.

3. Стекольников И. С. Исследование природы длинной искры. Изв. АН СССР, ОТН 11, 1936.

4. Аркадьев В. К. Генератор молний. Электричество, 10, 1940.

5. Потужный А. К. и Фертик С. М. Перевозной генератор импульсов. Электричество, 20, 1936.

6. Горев А. А. и Машкиллейсон Л. Е. Новый импульсный генератор лаборатории проф. А. А. Смурова. Электричество, 1, 1937.

7. Горев А. А. и Рябов Б. М. Генератор импульсных напряжений на 4300 кВ. Электричество, 5, 1941.

8. Техника высоких напряжений, Госэнергоиздат, ч. 1, 1951.

9. Типикин К. И. Передвижная установка на 4 млн. вольт (реферат). Электричество, 8, 1938.
10. Долгинов А. И. Импульсный генератор на 3000 кв. Энергетическое обозрение, 10, 1936.
11. Соломонов Н. М. Импульсный генератор высоких напряжений. ЖТФ, 1, 1937.
12. Балыгин И. Е. Импульсный генератор на средние напряжения. ЖТФ, 9, в. 12, 1939.
13. Воробьев А. А. Сверхвысокие электрические напряжения. Госэнергоиздат, 1954.
14. Хендрикс А. Б., Хеббард Х. С., Валлин Г. Л. Высоковольтное оборудование компании Джeneral Электрик на международной выставке в Нью-Йорке. Американская техника и промышленность, 11, 1939.
15. M. Newman and. O. Kemppainen. High-Voltage Installation of the Precipitation-Static Project, Proc. Inst. of Radio Eng., 1946, 34, p. 247.
16. D. F. Miner. "A Million volt Rectified Surge Generator," El. J. 1927, V. XXIV, № 6, p. 287.
17. O. Ackermann. New Surge Generator for Testing Transformers. El. J. 1932, 29, p. 61.
18. D. F. Miner. Surge Generating Equipment. El. J. 1926, 23, p. 596,
19. J. Liston. Developments in the Electrical Industry during 1931. G.E.R. 1932, v. 35, № 1.
20. A New Impulse Generator 2 500 000 volt. Gen. El. Rev. 1949, IV. V. 16, № 2, p. 85.
21. A. Bouwers. Elektrische Hochspannungen. Springer, Berlin, 1941.
22. F. S. Edwards and G. J. Scoles. A 2000 KV Impulse Generator, Engineering 1937, v. 27, 144, p. 222.
23. High—Voltage Research Laboratory. Engineering, 1930, v. 129, p. 312.
24. British Electricity Research Laboratories at Leatherhead. Engineer, 1950, v. 190, № 4931, p. 102.
25. Twelv—stage Impulse Generator. The Electrician 1951, 2, 11, p 1361.
26. T.R.P. Harrison. The Henley 1200000 volt Impulse Testing Plant. The Electrician. Part I, 1947, V. 138 № 3598.
27. Долгинов А. И. Передвижной генератор импульсов (реферат). Энергетическое обозрение, 5—6, 1936.
28. Hidemichi Rokkaku and Jukihiro Shigu A 3600 kv Impulse Generator and A 100 kv, Impulse Generator for open Air Set. E.T.J. 1937, № 3, p. 75, 120.
29. Галонен Ю. М. Новый импульсный генератор на 2400 кв (реферат). Электричество, 7, 1940.
30. Караулов Н. А. Импульсный генератор на 3000 кв (реферат), Электричество, 12, 1940.
31. J. H. Hagenguth. New High—Voltage Engineering Laboratory G.E.R. 1949, v. 52, № 9, p. 9.
32. F. S. Edwards, A. S. Husbands, F. R. Perry. The Development and Design of High—Voltage Impulse Generators. Inst. El. Eng. 1951, v. 98, part II, N III, p. 155—180.
33. The Impulse Testing Transformers. El. Eng. 1952, v. 71, № 8.
34. Impulse Generator. El. Rev. v. 155, № 24, p. 922, 1954.